

射流三通对灌水器抗堵塞特性的影响

王新坤 樊二东 徐胜荣 张晨曦 薛子龙 王 轩

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

摘要: 为探明射流三通应用射流附壁与切换技术形成的脉冲水流对滴灌灌水器抗堵塞能力的影响和原因, 采用筛分法, 分选出6种小于0.1 mm的泥沙粒径段, 配置成3种泥沙级配组合和0.5、1.0、1.5 g/L含沙量浑水, 总进口压力为0.1 MPa, 分析射流三通和普通三通条件下滴灌测试系统的抗堵塞特性。结果表明: 射流三通产生脉冲振幅为27 kPa和振荡频率为236次/min左右的脉冲水流, 对粒径为0.03~0.05 mm和0~0.03 mm的泥沙抗堵塞能力较为显著, 对粒径为0.05~0.10 mm的泥沙颗粒随着含沙量的增大抗堵塞能力呈减弱趋势; 射流三通测试系统发生堵塞的灌水次数平均比普通三通测试系统多3~8次; 不同含沙量下射流三通测试系统相对平均流量和灌水均匀性都高于普通三通, 射流三通产生的高频脉冲水流是灌水器抗堵塞能力强于普通三通的主要因素。

关键词: 射流三通; 脉冲水流; 振幅频率; 泥沙粒径; 抗堵塞

中图分类号: S275.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)03-0281-07

Effect of Jet Tee on Anti-clogging Characteristics of Emitters

WANG Xinkun FAN Erdong XU Shengrong ZHANG Chenxi XUE Zilong WANG Xuan
(Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Aiming to investigate the jet flow and the switching technology that form the pulse flow and the anti-clogging ability in drip irrigation emitter. Six kinds of sediment particle size segments less than 0.1 mm were sorted by screening and organized into three types. Sediment grading combination concentrations were 0.5 g/L, 1.0 g/L and 1.5 g/L, with total inlet pressure of 0.1 MPa, and the anti-clogging characteristics of the drip irrigation test system under jet tee and tee conditions were analyzed. Results showed that the jet tee can generate pulse amplitude of 27 kPa, with oscillating frequency of 236 times/min and pulse current of 0.5 g/L and 1.0 g/L of sediment graded water with strong anti-clogging ability, and the anti-clogging ability of 0.03~0.05 mm and 0~0.03 mm of sediment particle size was more significant, and the anti-clogging energy of 0.05~0.10 mm of sediment particle size was increased with the increase of concentration. The force showed a weakening trend, and the average number of irrigations of the jet tee test system was 3~8 times more than that under tee conditions. The average test system of the jet tee at different sediment concentrations was relatively moderate, while the flow rate and irrigation uniformity was higher than that under the tee conditions. The pulse water pressure generated by the jet tee was the main reason for the anti-clogging ability of the emitter, which was superior than that under the tee conditions.

Key words: jet tee; pulse water flow; amplitude frequency; sediment particle size; anti-clogging

0 引言

滴灌具有灌水均匀、高效节水节肥、改善作物品质、增产增收等特点, 是我国大面积推广应用的高效节水灌溉方式之一^[1]。但是滴灌的毛管及灌水器

内流速较小, 增大了灌水器堵塞几率, 灌水均匀度受到影响^[2], 因此, 堵塞与灌水均匀性是低压滴灌与地下滴灌技术的难点, 也是影响其发展的关键问题。众多学者围绕优化流道结构参数及优化设计流道边界, 来保证流道内具有良好的流动状态, 提升流道内

水流对颗粒物的运移能力,进而达到提高流道抗堵塞能力的目的^[3-5]。魏正英等^[6-8]分析迷宫道内部流动场的情况及堵塞机理,提出迷宫流道的设计方法。喻黎明等^[9]分析了梯形流道内含沙量分布及水沙流速分布,并以某一含沙量分布线作为流道边界,对流道进行优化,由此获得较好的灌水器流道模型。闫大壮等^[10]采用CFD模拟迷宫流道内悬浮颗粒的运动情况,得出粒径大于0.075 mm颗粒不能很好地随水流动,是引起堵塞的主要物质。王文娥等^[11]采用CFD对粒径小于0.1 mm颗粒在流道中的运移情况进行模拟,指出粒径在0.01~0.04 mm范围内不易引起滴头堵塞。近年来,为提高滴灌系统及灌水器的抗堵塞性能,有学者提出动态水压滴灌管系统,这种方法有别于已有的脉冲滴灌系统方式^[12],它通过制造动态水压加剧滴灌内水流的紊动,提高水流对颗粒物的输移能力,从而改善系统和灌水器抗堵塞性能^[13-14],这种动态水压滴灌能明显地降低灌水器水力性能及堵塞性能,但这种脉冲发生器造价较高,安装、试验、维护复杂,可靠性难以保证,是制约脉冲滴灌技术发展的关键问题之一。王新坤^[15]设计了一种结构简单的射流脉冲三通作为脉冲发生器,利用射流附壁原理能够在滴灌带内形成脉冲水流,压力水流进入射流喷嘴形成射流,在控制管内产生负压,切换射流附壁方向,驱使水流在两条毛管形成间歇性水流,实现持续的脉冲水流。杨玉超^[16]研究发现随着射流三通喷嘴宽度的增大,振幅和频率以一定的反比关系变小,随着进口压力的增大脉冲频率和脉冲振幅也在增大。许鹏等^[17-19]进行了射流脉冲三通的滴灌带实验,验证了连接滴灌带的射流三通能提高灌水均匀度及降低流量偏差率。王新坤等^[20-21]分析了脉冲水流对毛管、支管与射流三通的优化匹配试验,拟合了支管和毛管射流脉冲三通进口流量与水头损失、水头振幅与水头损失、脉冲频率与水头损失、进口水头最大值与平均值的关系统,提出了脉冲滴灌灌水小区的脉冲参数设计方法。上述研究主要集中于射流三通对毛管水力特性方面,未进行射流三通对滴灌灌水器抗堵塞的性能研究。

本文通过不同泥沙级配组合、不同的含沙量开展射流三通与普通三通条件下滴灌灌水器的抗堵塞对比试验,分析射流三通产生的高频脉冲水流及固体颗粒粒径、含沙量对灌水器流量及堵塞的影响规律。通过试验测试,分析灌水器平均相对流量、灌水均匀系数、射流三通抗堵塞能力与适用范围,以期构建水力性能和抗堵塞性能俱佳的脉冲滴灌系统提供理论基础。

1 材料与方方法

1.1 试验材料与装置

试验测试装置由4 mm喷嘴宽度的射流三通、水沙混合设备组成。试验水箱规格为高0.9 m、圆周长2 m的圆柱体水箱,上端固定回水管,通过水流将泥沙混合均匀。离心泵额定扬程45 m,压力表量程0.16 MPa,精度等级0.4级。毛管布设于测试架上,共有15条滴灌带,每条含5个灌水器,共75个灌水器,其间距0.3 m,滴灌带采用华维有限公司生产的迷宫流道滴灌带,其基本参数为:管外径16 mm,额定流量2.7 L/h,进口栅格数3个,齿高4.0 mm,齿间距1.83 mm,流道深2.16 mm,流道长度20.13 mm,缓水区为6.75 mm×4.23 mm的长方形。试验装置如图1所示。

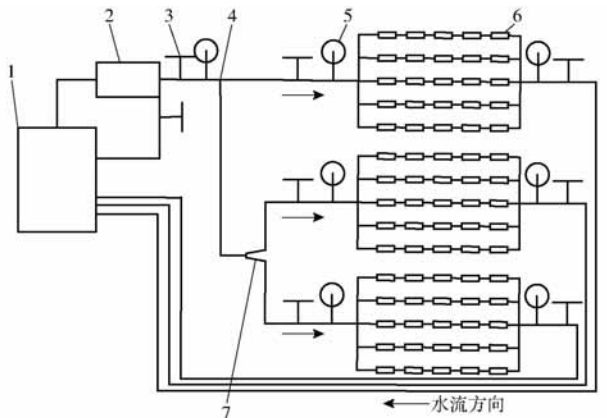


图1 试验平台布置示意图

Fig.1 Layout of experiment platform

1. 水沙混合箱 2. 水泵 3. 阀门 4. 普通三通 5. 压力表 6. 灌水器 7. 射流三通

试验的参数、模型及边界条件如下:射流三通结构如图2所示,主要由3部分组成:进口段、出口段、射流元件,其中射流元件核心结构尺寸为:喷嘴宽度 $w=4$ mm,位差 $s=2.1$ mm,侧壁夹角 $\theta=20^\circ$,劈距 $h=28$ mm,控制管宽度 $c_w=5$ mm,出口内宽度 $i_{ow}=10$ mm,分流劈半径 $R=2$ mm。

泥沙为风干土壤,粒径(D)小于0.10 mm,采用150~650目筛网,经过高频振荡研磨筛分处理,将其分为0~0.02 mm、0.02~0.030 8 mm、0.030 8~0.038 mm、0.038~0.05 mm、0.05~0.075 mm、0.075~0.1 mm范围的6种粒径,设定浑水含沙量为0.5、1.0、1.5 g/L。为确定射流三通和普通三通条件对不同粒径的滴头堵塞影响,设置如表1所示的3种泥沙级配,灌水器浑水试验的总压力为0.1 MPa。

1.2 试验方法

采用连续性浑水滴灌测试方法,将6种粒径范

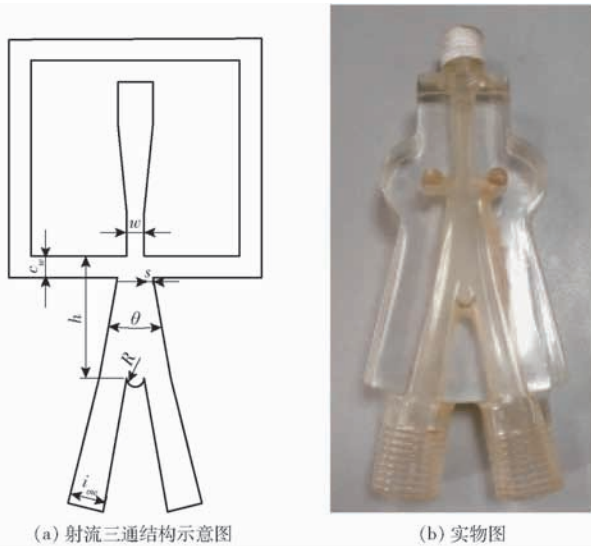


图 2 射流三通

Fig. 2 Jet pulse tee

表 1 泥沙级配

Tab. 1 Sediment gradation %

级配编号	D/mm		
	0 ~ 0.03	0.03 ~ 0.05	0.05 ~ 0.10
A	20.38	57.10	22.52
B	48.50	13.20	38.30
C	20.13	23.55	56.32

围的泥沙分别配成含沙量为 0.5、1.0、1.5 g/L 的浑水,参考短周期堵塞的试验方法,每次灌水时间为 30 min,间隔 30 min 连续灌水,滴头流量间隔 30 min 采用电子秤测量一次,射流三通与普通三通的管网测试系统中灌水器的平均流量低于额定流量的 75% 时,停止试验,拆掉滴灌带,并对管道系统、水箱、泵等冲洗 3 次,保证系统中无泥沙残留,更换新的滴灌带,进行下一组试验。为深入分析射流三通对灌水器抗堵塞的影响,利用 JT-HD61E 型高速摄像机拍摄射流三通两侧进口压力振幅和频率变化过程,通过后处理软件 i-SPEED 记录压力变化值,通过 OriginPro 9.0 绘制压力变化曲线,并分析其抗堵塞能力。

1.3 评价指标与方法

将实测流量与设计流量的 75% 对比来判定单个滴头是否发生堵塞,但对于灌水系统,目前还没有统一的堵塞评价标准方法,因此,本文通过克里斯琴森均匀度系数、平均相对流量和流量降幅结合的方法评价堵塞情况。当滴头发生堵塞时,克里斯琴森均匀度系数和平均相对流量减小,堵塞越严重,减小的幅度越大,而流量降幅相应升高。克里斯琴森均匀度系数的计算式为

$$C_u = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |q_i - \bar{q}|}{n\bar{q}} \right] \times 100\% \quad (1)$$

式中 C_u ——克里斯琴森均匀度系数, %
 i ——滴头序号
 n ——滴头总数
 q_i ——第 i 个滴头的实测流量, L/h
 \bar{q} ——浑水平均流量, L/h

试验时滴管系统随着灌水次数的增加滴头堵塞加剧,射流三通和普通三通条件下测试系统中滴头之间流量差异较大,以平均相对流量低于 75% 作为评价指标。

$$q_r = \bar{q}/q_0 \times 100\% \quad (2)$$

式中 q_r ——平均相对流量, %
 q_0 ——清水平均流量, L/h

$$q_d = (q_0 - q_i)/q_0 \times 100\% \quad (3)$$

式中 q_d ——流量降幅, %

2 结果与分析

2.1 射流三通对滴头堵塞的影响

以平均相对流量低于设计流量 75% 发生严重堵塞时的灌水次数作为因变量,结果表明,粒径和浑水含沙量对堵塞的影响具有显著差异。不同含沙量浑水的平均相对流量 q_r 与灌水次数的克里斯琴森均匀度系数 C_u 如图 3 所示。

图 3 中 A1 和 A2、B1 和 B2、C1 和 C2 代表级配 A、B、C 条件下射流三通左出口和右出口连接的滴灌测试系统的 q_r 和 C_u ,图中 A3、B3、C3 代表 3 种级配条件下普通三通连接滴灌测试系统的 q_r 和 C_u 。由图 3 可知,射流三通对于灌水器抗堵塞能力并不完全随着粒径增大而增强,而是随着粒径和含沙量的增大,射流三通的抗堵塞能力呈先增强后减弱的趋势,说明一定含沙范围内,存在射流三通对于泥沙粒径抗堵塞能力强的敏感粒径范围。

3 种级配浑水灌溉试验条件下,随着含沙量和灌溉次数的增加,滴头流量的变化快慢程度也不同。当级配 A 浑水的含沙量为 0.5 g/L 时,粒径范围为 0.03 ~ 0.05 mm 占到 57.10%,且该含沙量下级配 A 随着灌水次数的增加,普通三通条件下平均相对流量下降速率较为显著,而射流三通较普通三通连接滴灌的滴头流量变化较为缓慢,连续灌水 12 次后,普通三通连接的滴灌测试系统滴头堵塞率已超过 25%,其平均相对流量低于 75%,已经发生了严重堵塞,射流三通条件下两侧的个别滴头发生堵塞,随着灌水次数增加到 16 次后,射流三通右侧的平均流量低于 75%,而左侧平均相对流量为 82.3%,且随着灌水次数的增加,射流三通两侧与普通三通条件下的克里斯琴森均匀度系数差值在逐渐增大,说明射流三通产生的高频脉冲水流对该级配 A 浑水在

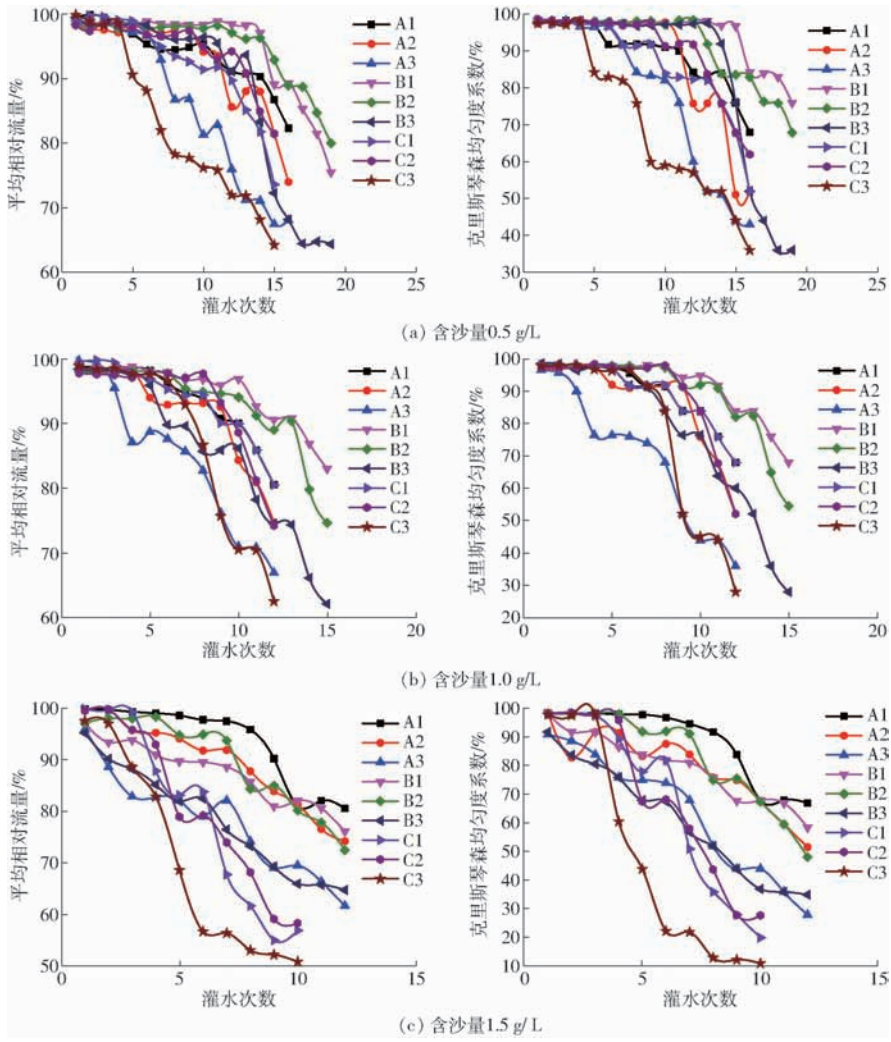


图3 相对流量与克里斯琴森均匀度系数变化曲线
 Fig.3 Changing curves of relative flow and Christianson uniformity

含沙量 0.5 g/L 时滴头抗堵塞性能较好,这是因为射流三通能产生高频脉冲水流,使灌水器中水流紊动剧烈,流场速度变化较大,增强了水流在灌水器流道内的紊动性和挟沙能力,使得射流三通在该含沙量对 0.03 ~ 0.05 mm 范围泥沙抗堵塞能力较为明显。当级配 B 浑水含沙量为 1.0 g/L 时,0 ~ 0.03 mm 的泥沙粒径占到 48.50%,普通三通条件下灌水 11 次后平均相对流量为 74%,而射流三通右侧灌水 14 次后平均相对流量为 75%,左侧灌水 15 次后,平均相对流量为 83%,表明该级配浑水在含沙量为 1.0 g/L 时,该含沙量对级配 B 粒径小于 0.03 mm 的泥沙,射流三通较普通三通抗堵塞能力也较强。当级配 C 浑水的含沙量为 1.5 g/L 时,粒径为 0.05 ~ 0.10 mm 颗粒占到 56.32%,普通三通灌水 4 次后平均相对流量已降到 75% 以下,而射流三通连接的两侧灌溉次数分别为 5、7 次,说明在 0.05 ~ 0.10 mm 范围的粒径,射流三通的抗堵塞能力也随着泥沙含沙量的增加在迅速下降,而克里斯琴森均匀度系数也在逐渐下降,表明当含沙量小于 1.0 g/L 时,射流

三通和普通三通对于同颗粒级配浑水对滴头堵塞的影响有显著差异,当含沙量大于 1.0 g/L 时,射流三通对泥沙级配的抗堵塞影响有所降低,级配 C 粒径在 0.05 ~ 0.10 mm 颗粒是射流三通抗堵塞能力最差的泥沙粒径,主要原因是随着粒径和含沙量的增大,射流三通产生的高频脉冲水流对颗粒作用力减弱,颗粒粒径的增大,自身重力影响较大,不易随着水流的紊动流出流道,使得流道中的泥沙颗粒彼此凝结,泥沙更容易沉积,依附在流道形成较大的絮结构,易引发堵塞。

级配 B 和级配 C 在含沙量为 0.5 g/L 时,普通三通条件下分别灌溉 14 次和 8 次后平均相对流量分别为 62% 和 75%,克里斯琴森均匀度系数在 60% ~ 76% 之间,该级配浑水即使在低含量时也易引起堵塞,射流三通在该级配条件下,两侧灌水次数分别在 19 和 16 次后滴头的平均相对流量低于 75%,克里斯琴森均匀度系数在 70% ~ 80% 之间,射流三通相对于低含沙量粒径在 0.05 ~ 0.10 mm 范围内颗粒物的抗堵塞能力较显著,灌水均匀性较高,

随着泥沙含沙量的增加射流三通对该粒径的抗堵塞能力较差。普通三通条件下,当含沙量增加到 1.0 g/L 和 1.5 g/L 时,灌水 5、11 次后平均相对流量小于 75%,而射流三通条件下的灌水次数为 12、15 次,且克里斯琴森均匀度系数高于普通三通 10%~25%,说明级配 B、C 浑水灌溉时,对于泥沙粒径较大、含沙量较低的浑水,射流三通产生的脉冲水流对颗粒作用力也较为显著,因为含沙量较低,颗粒碰撞几率下降,水流紊动剧烈,泥沙难以形成较大的絮团造成流道堵塞,射流三通产生的水流对于低含沙量大粒径的级配也表现出较强抗堵塞能力。

级配 B 在不同含沙量时,平均相对流量与克里斯琴森均匀度系数随着灌水次数增加的下降趋势基本与级配 A 与 C 相似,但其下降速度小于级配 A 和 C,说明 0~0.03 mm 的泥沙粒径占到 48.5% 时,脉冲水流紊动较为剧烈,此粒径受水体紊动影响较为明显,在灌水器流道中难以沉降,射流三通相对普通三通条件下水流紊动强烈,泥沙更易随着水流流出,因此在含沙量较低或较高时也不易造成滴头堵塞,射流三通抗堵塞效果较显著。而级配 A 粒径在 0.03~0.05 mm 范围内的泥沙所占比例较大,此细小颗粒和黏颗粒团聚较明显,表现出较为特殊的物理特性,颗粒之间碰撞凝结作用较强,大颗粒首先堆积在一起形成骨架结构,细小颗粒因其具有较大的表面吸附力,迅速吸附在较大的颗粒表面,并作为粘合剂连接相邻的大颗粒,使其团聚结构继续增大,而脉冲水流有较强的紊动和冲刷作用,在含沙量较低时,脉冲水流对此粒径泥沙作用效果明显,抗堵塞能力强,随着含沙量增大,射流三通对其堵塞能力减弱,因此也容易造成堵塞。级配 C 粒径在 0.05~0.10 mm 时,由于含沙量和泥沙粒径都较高,随水进入灌水器流道后,在自身重力作用下较易沉积,易造成滴头内颗粒相互碰撞、沉积,从而造成堵塞,而射流三通产生的脉冲水流对流道内大颗粒泥沙作用力较小,传递的能量不足以使大颗粒泥沙随水流排出,从而流道内开始沉积泥沙,流道逐渐发生堵塞,因此级配 C 较级配 A 和 B 更易造成堵塞,射流三通的脉冲水流对堵塞的敏感性下降。

由图 4 可知,含沙量在 0.5~1.0 g/L 范围内灌水次数下降速度较 1.0~1.5 g/L 下降速度慢,且射流三通与普通三通的灌溉次数差值随着浑水的增加逐渐减小,说明随着含沙量的增大,射流三通的抗堵塞能力减弱,整体上灌水次数大于普通三通。射流三通能够增强灌水器抗堵塞的能力和延缓流道堵塞时间,这是因为射流三通能够产生一定频率和振幅的脉冲水流,使水流在毛管内形成间歇性水流,增大

了水流对灌水器流道内泥沙的冲刷作用,增强了滴灌灌水器的抗堵塞能力,平均比普通三通条件下滴头堵塞个数少 2~5 个,说明射流三通产生的脉冲水流能够解决灌水器堵塞问题。

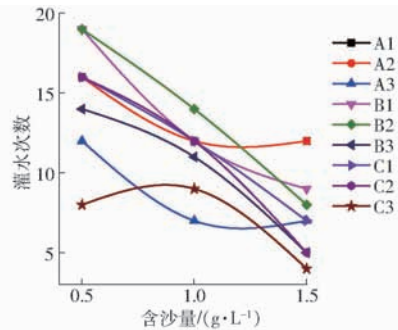


图 4 不同含沙量下级配和灌水次数的关系

Fig. 4 Relationship between gradation of different sediment concentration and irrigation times

2.2 射流三通抗堵塞特性分析

流量作为衡量灌水器水力性能的重要因素,其大小可以直接反映整个测试系统的供水能力,表 2 为射流三通和普通三通滴头的平均流量。由于射流三通的脉冲效果,两侧连接滴灌带的压力是随时间变化的,相同进口压力下,射流三通左右两侧的脉冲振幅和流量相同,而脉冲水压下灌水器流道内水压不断地波动变化,具有周期性的脉冲水压对灌水器的平均流量影响必定小于普通三通条件,流量相对偏差在 1%~4% 之间,偏差较小,说明脉冲水压对滴灌系统的供水能力影响较小。

表 2 不同压力下射流三通和普通三通滴头实测平均流量

Tab. 2 Measured average flow rate of jet tee and tee through common emitter at different pressures

总压力/ kPa	平均流量/(L·h ⁻¹)			相对 偏差/%
	射流三通左侧	射流三通右侧	普通三通	
50	1.44	1.46	1.56	3.7
75	1.98	1.99	2.12	3.2
100	2.30	2.31	2.48	3.4
120	2.59	2.61	2.68	1.3

由表 3 和图 5 可知,射流三通相对普通三通能产生类似正弦波的脉冲水流,且具有一定的振幅和频率,滴灌带进口压力最大值与最小值的差值为脉冲振幅,时间间隔为脉冲周期。相比普通三通,射流三通连接的滴灌测试系统的工作水压始终不断变化,左侧水压始终持续在 57~84 kPa 之间,振荡频率保持在 236/min 左右,说明射流三通能产生高频率脉冲水流。随着时间的变化,流道内工作水压不断变化,灌水器内流场流速变化较大,加强了紊动过程,增加了灌水器流道中水流的紊动性能,使得流道

表3 测试滴灌系统进口压力与振幅
Tab.3 Inlet pressure and amplitude of drip irrigation system

参数	数值	
总进口压力/kPa	100	
滴灌带进口压力/kPa	射流三通左侧	57~84
	射流三通右侧	56~83
	普通三通	84
脉冲振幅/kPa	射流三通左侧	27
	射流三通右侧	27
	普通三通	0
振荡频率/(次·min ⁻¹)	射流三通左侧	236
	射流三通右侧	235
	普通三通	0

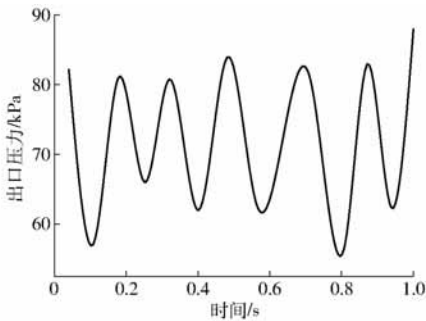


图5 射流三通出口压力曲线

Fig.5 Pressure curve of jet tee outlet

水流流速始终保持较大幅度的上下波动,水流始终紊动强烈,从而水流在灌水器流道内传递能量较好,将能量传递给沉积在灌水器流道内的堵塞泥沙,并冲击流道内沉积的堵塞介质,随着脉冲水流波峰和波谷的周期性变化,使得泥沙沉积区不断遭到冲击并发生破坏,射流三通的脉冲效应使得颗粒物发生

强烈冲击,并对滞留甚至沉积在流道的泥沙发生强烈冲击,使得泥沙重新运动,颗粒物离底悬浮,并迅速通过流道,增强了水流挟沙能力,极大地增大了脉冲水流对颗粒物的输运能力,从而增强流道的抗堵塞性能。而普通三通测试系统中,水流稳定,灌水器内流场流速较稳定,紊动程度低,而在工作水压均匀变化阶段,由于每点压力值持续时间短,对内流场流速的增加作用小,内流场的紊流程度低,水流挟沙堵塞介质能力差,易发生堵塞。所以同等条件下,普通三通相对射流三通条件下水流携带堵塞介质的能力较弱,更容易发生堵塞。因此,射流三通产生的高频脉冲水流可以有效提高灌水器流道的抗堵塞能力。

3 结论

(1)不同含沙量条件下,射流三通对于0.03~0.05 mm和0~0.03 mm的泥沙粒径抗堵塞能力较显著,对0.05~0.10 mm的泥沙粒径,随着含沙量的增大抗堵塞能力呈减弱趋势。

(2)与普通三通相比,射流三通连接滴灌测试系统的滴头平均流量较小,而不同含沙量条件下灌水器的平均相对流量和灌水均匀性均高于普通三通,灌水次数也高于普通三通3~8次。

(3)相对于普通三通,射流三通能够产生类似正弦波的高频脉冲水流,水流能在灌水器流道内进行周期性的大幅度上下波动,加剧灌水器流道中水流的紊动性能,使得水流能够持续冲刷流道沉积的泥沙,极大地增大了脉冲水流对颗粒物的输运能力,并迅速通过流道,射流三通产生的高频脉冲水流能够增强灌水器流道的抗堵塞能力。

参 考 文 献

- [1] 曹建生,张万军. 微灌节水技术与机理研究[J]. 节水灌溉, 2000(6): 5-7.
CAO Jiansheng, ZHANG Wanjun. Study on WS technique and mechanism for micro-irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2000(6): 5-7. (in Chinese)
- [2] 王聪. 波动水压对灌水器水力性能影响的实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
WANG Cong. Research on experiment of the effect of dynamic pressure on the hydraulic properties of drip emitters[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- [3] 魏正英, 赵万华, 唐一平, 等. 滴灌灌水器迷宫流道主航道抗堵设计方法研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(6): 1-7.
WEI Zhengying, ZHAO Wanhua, TANG Yiping, et al. Anti-clogging design method for the labyrinth channels of drip irrigation emitters[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(6): 1-7. (in Chinese)
- [4] 牛文全, 吴普特, 喻黎明. 基于含沙量等值线的迷宫流道结构抗堵塞设计与模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 14-20.
NIU Wenquan, WU Pute, YU Liming. Anti-clogging experimental investigation and optimized design of micro-channels of emitter based on isoline of sand content[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(5): 14-20. (in Chinese)
- [5] 芦刚, 史玉升, 魏青松, 等. 基于两相流模拟的高抗堵滴灌灌水器开发方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(7): 118-121.
LU Gang, SHI Yusheng, WEI Qingsong, et al. Development method for high anti-clogged drip emitters based on two-phase flow simulations[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2007, 35(7): 118-121. (in Chinese)
- [6] 魏正英, 唐一平, 温聚英, 等. 灌水器微细流道水沙两相流分析和微 PIV 及抗堵实验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 1-9.

- WEI Zhengying, TANG Yiping, WEN Juying, et al. Two-phase flow analysis and experimental investigation of micro-PIV and anti-clogging for micro-channels of emitter[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(6): 1-9. (in Chinese)
- [7] 王新坤, 李俊红, 单彬, 等. 三角绕流滴灌灌水器结构设计和优化[J]. 农业机械学报, 2010, 41(增刊): 43-46.
WANG Xinkun, LI Junhong, SHAN Bin, et al. Structural design and optimization of triangle circulation drip irrigation emitter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.): 43-46. (in Chinese)
- [8] 葛令行, 魏正英, 曹蒙, 等. 微小迷宫流道中的泥沙沉积规律[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 20-24.
GE Lingxing, WEI Zhengying, CAO Meng, et al. Deposition law of sand in labyrinth-channel of emitter[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(3): 20-24. (in Chinese)
- [9] 喻黎明, 邹小艳, 谭弘, 等. 基于 CFD-DEM 耦合的水力旋流器水沙运动三维数值模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 126-132.
YU Liming, ZOU Xiaoyan, TAN Hong, et al. 3D numerical simulation of water and sediment flow in hydrocyclone based on coupled CFD-DEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 126-132. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160117&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.017. (in Chinese)
- [10] 闫大壮, 杨培岭, 任树梅. 滴头流道中颗粒物运动动态分析与 CFD 模拟[J]. 农业机械学报, 2007, 38(6): 71-74.
YAN Dazhuang, YANG Peiling, REN Shumei. Study on dynamic analysis of particle movement in drip emitter based on CFD [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(6): 71-74. (in Chinese)
- [11] 王文娥, 王福军. 片状迷宫滴头中悬浮颗粒浓度分布规律数值分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 1-6.
WANG Wene, WANG Fujun. Numerical analysis of the distribution rule for suspended granule concentration in labyrinth integrated emitter[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(3): 1-6. (in Chinese)
- [12] 芦刚. 工作水压对滴灌灌水器水力性能影响规律的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
LU Gang. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy in engineering [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [13] 郑超, 吴普特, 张林, 等. 动态水压下迷宫流道水流运动特性研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 167-172.
ZHENG Chao, WU Pute, ZHANG Lin, et al. Flow characteristics in labyrinth channel under dynamic water pressure[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 167-172. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150924&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.024. (in Chinese)
- [14] 郑超, 吴普特, 张林, 等. 不同动态水压模式下迷宫流道内颗粒物运动特性研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 294-301.
ZHENG Chao, WU Pute, ZHANG Lin, et al. Particles movement characteristics in labyrinth channel under different dynamic water pressure modes[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 294-301. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170337&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.037. (in Chinese)
- [15] 王新坤. 一种射流三通: 201310120097.5[P]. 2013-07-17.
- [16] 杨玉超. 射流脉冲三通振荡特性影响因素研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
YANG Yuchao. Study on influence factors of oscillation performance of jet-pulse tee [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016. (in Chinese)
- [17] 许鹏, 王新坤, 高世凯, 等. 射流振荡三通与滴灌毛管脉冲初步试验研究[J]. 节水灌溉, 2014(3): 1-4.
XU Peng, WANG Xinkun, GAO Shikai, et al. Preliminary test of jet oscillation tee and pulse flow in drip irrigation lateral pipe [J]. Water Saving Irrigation, 2014(3): 1-4. (in Chinese)
- [18] 樊二东, 王新坤, 肖思强, 等. 基于喷嘴宽度对射流三通水力性能试验与模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(9): 836-840.
FAN Erdong, WANG Xinkun, XIAO Siqiang, et al. Experiment and simulation of hydraulic performance of pulse jet tee with various nozzle widths[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(9): 836-840. (in Chinese)
- [19] 杨玉超, 王新坤, 朱燕翔, 等. 基于射流脉冲三通的滴灌带试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(9): 111-114.
YANG Yuchao, WANG Xinkun, ZHU Yanxiang, et al. An experimental study of the jet pulse tee based on drip irrigation pipes [J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(9): 111-114. (in Chinese)
- [20] 王新坤, 肖思强, 樊二东, 等. 滴灌毛管首部射流脉冲三通水力特性试验研究[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12): 116-121.
WANG Xinkun, XIAO Siqiang, FAN Erdong, et al. Hydraulic performance experiment of lateral pipe jet-pulse tee [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(12): 116-121. (in Chinese)
- [21] 肖思强, 王新坤, 樊二东, 等. 射流脉冲三通毛管灌水均匀性试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(7): 632-638.
XIAO Siqiang, WANG Xinkun, FAN Erdong, et al. Experimental study on irrigation uniformity of lateral pipe with jet-pulse tees [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(7): 632-638. (in Chinese)